

【整番】FE-12-TM-011	【標題】スチームカーテン要目の決定方法(案)
分類：流れ(噴流)／種別：技術メモ	作成年月：H20.6／改訂：Ver0.0(H20.8)
	作成者：N.Miyamoto

全 13 枚

1. 初めに

スチームカーテンは漏洩した可燃性ガスと火気源を遮断する除害設備である。高圧ガス保安法では、「可燃性ガスまたは酸素のガス設備の付近にある分解炉、加熱炉などの火気を大量に取り扱う製造設備にはスチームカーテン(水蒸気を噴出することにより、漏洩した可燃性ガスの当該製造設備への侵入を防止するための設備をいう) またはこれと同等以上の能力を有する設備を設ける」ことを要求している。

スチームカーテンは火気源とみなされる設備の周辺を囲うようにヘッダーパイプをネット状に巡らし、パイプに明けたキリ孔から水蒸気を噴射し噴流を連ねて遮断幕を構成する、至ってシンプルな設備である。然るに技術情報は限られており、初発として設備の設計に取り組むとき、ある種の躊躇がある。ここでは多少の類推を手がかりに設備要目の簡易的な決定方法を思案してみた。以下これを記す。

なお本 TS では多々、噴流に関する工学知見を拡大適用しているので使用に際しては注意願いたい。また、ここでは噴流について Blevins のテキスト⁽¹⁾記述を引用しているが、これについては、下記の TS で紹介している(照合確認はこれによるのが速い)。

【FE-12-TM-001 各種噴流に関する情報－(その 1)潜り噴流】

【FE-12-TM-003 各種噴流に関する情報－(その 3)横風を受ける噴流/渦巻き噴流】(準備中)

【FE-12-TM-006 プリュームと浮力噴流に関する情報－その 1 基本形】

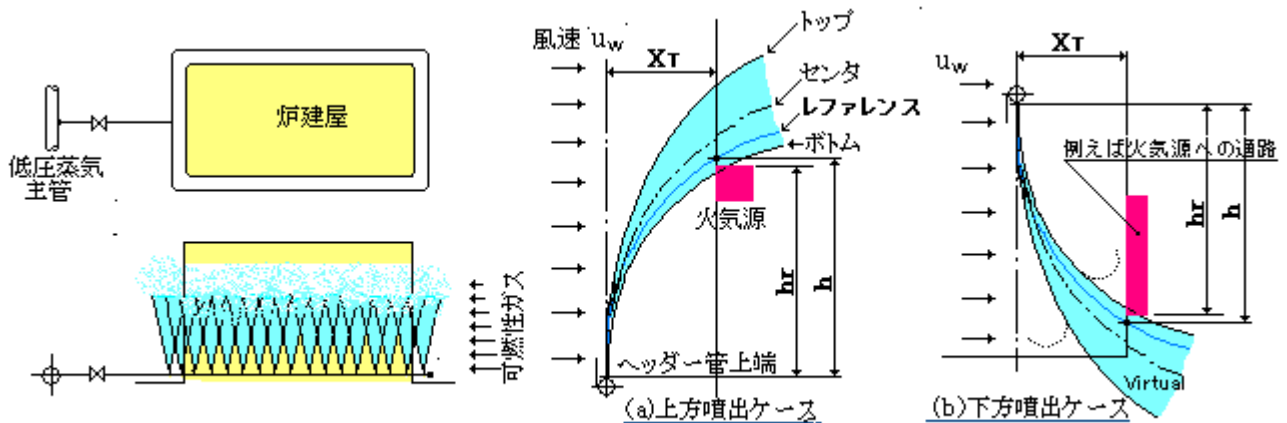


図1 スチームカーテン設備例

図2 スチームカーテン概念図

2. 設計パラメータ

(1) 設備機能の尺度は、噴出し時の噴流の有効高さである。基本的に[有効高さ > 必要有効高さ]になるように設計する。有効高さをアップするには噴出速度を大きくする。噴出速度はヘッダー元圧に依存する。大気圧/元圧の比が限界圧力比を越えるとチョークして噴出速度は最大値即ち音速になるので、通常、

$$\text{ヘッダー元圧} > [\text{大気圧} \div \text{限界圧力比}]$$

でヘッダー元圧(目孔の 1 次側圧力)を設定する。ここで限界圧力比 = $\{2/(\kappa + 1)\}^{\kappa/(\kappa - 1)}$ (κ = 比熱比)である。本 TS でもチョークした音速噴流を前提にして検討する。

[実際には限界圧力比は 0.54 程度なので、ヘッダー元圧は工場の低圧蒸気であればよい。しかしより高圧であるほど、噴出し流速あるいは縮流係数がアップして有効高さが増加する。]

(2) 噴流の噴出し方向は斜めになることもあるが、通常、鉛直上方あるいは下方としている。位置的には対象物の直近にヘッダーを敷設し、横風で噴流が靡いても対象物を覆うようにする。図2にこの関連を示す。この場合、各噴流が遮蔽機能を満たす上での必要条件は

- ① 有効高さ h が必要有効高さ h_r を上廻ること。
- ② 有効高さ以内の噴流流速が下限界(=設計風速)を下回らないこと。

①に関して、鉛直上方噴出しの有効高さ h は、均質噴流を仮定して略々次式で見積もることができる⁽¹⁾。

$$h = 2.4(u_o/u_w)^{0.72} X_T^{0.28} r_o^{0.72} \text{ -----(a)}$$

ここで、 h =有効高さ(m)、 u_o =孔噴出流速(m/s) $\cong C_c u_t$ 、 u_w =横なびきの設計風速(m/s)、

u_t =のど断面の流速(m/s) $= [\kappa \{2/(\kappa + 1)\} (P_1/\rho_1)]^{0.5}$ 、 C_c =縮流係数(-)、

P_1 =元圧即ち目孔1次側圧力(Pa)、 ρ_1 =目孔1次側の蒸気密度(kg/m³)、 κ =比熱比(-)

X_T =遮蔽対象までの水平距離(m)、 r_o =目孔半径(m)、

横風を受ける噴流は図2に示すように横なびきになり風を受ける側と受けない側の流線に大きく差異がでる。この場合、ボトムラインの内側に対象物(火気源など)があれば絶対安全ではあるが、それではややきつ過ぎるので、ここではボトムラインとセンタラインの中間を選びこれをレファレンスラインと称してこの内側に対象物をはいるようにする。レファレンスラインと X_T ラインの交点の高さが有効高さ h である。遮蔽機能上、 $h > h_r$ でなければならない。なお必要有効高さ h_r の原点はヘッダー上端即ち噴出口にとる。

②については、多少ややこしい。何故なら横なびき噴流には確定した流速分布式が見当たらないからである。そこで、無風状態の鉛直噴流のセンタライン沿い流速分布と有風状態の横なびき噴流のセンタライン沿い流速分布が同じと仮定する(下図参照)。鉛直上方噴流の高さ h における断面平均流速が、設計想定風速になったときに風の攪乱によって蒸気の消散が起きると仮定すると、

$$h = 4(u_o/u_w)r_o \text{ -----(b)}$$

この h を限界噴出流線長さ L_{ac} とする。前述の仮定によれば、噴出口から高さ h 位置までの横なびき噴流センタラインの弧長 L_a が、 L_{ac} を越えなければ当該レベルの風攪乱による噴流の消散は起きない。故に、②の要件は $[L_a < L_{ac}]$ で代替できる。なおセンタラインとレファレンスラインは接近するので、ここでは簡略化のため L_a はレファレンスライン上でカウントするものとする。

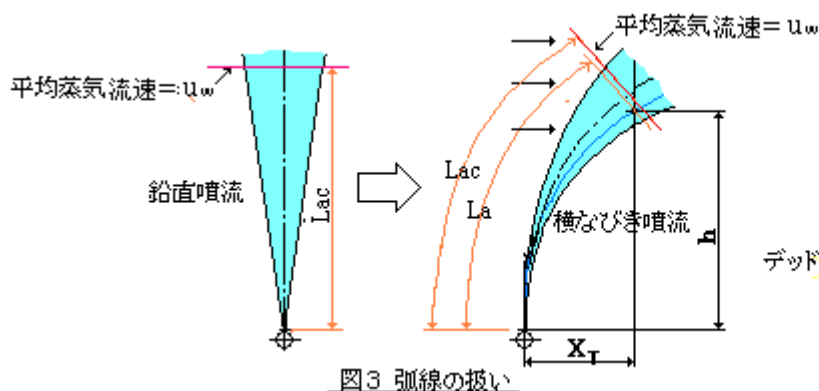


図3 弧線の扱い

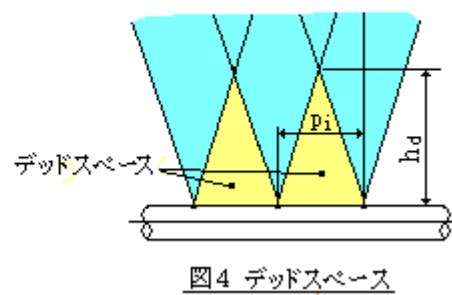


図4 デッドスペース

(3) 図4に示すように、ヘッダーからの噴出し部分には遮蔽の効かないデッドスペース(隙間)ができる。

この隙間高さ h_d は、略々

$$h_d = 5p_i \quad \text{ここで } p_i = \text{目孔の間隔(m)} \quad \text{-----}(c)$$

程度である。目孔間隔 p_i を縮めればデッドスペースを小さくすることができるが、それにも限度があるので、遮蔽板など種々工夫する必要がある。

- (4) 以上は設備機能に係わる設計パラメータであるが、設備としては更に噴出蒸気流量を求め、これをベースにしてヘッダー/導管類のサイズや形状を決めてゆく必要がある。各孔当たりの噴出流量は、次の式から得られる。

$$m = 0.635A_o(\rho_1 P_1)^{0.5} \quad \text{-----}(d)$$

ここで、 m = 各孔当たりの噴出蒸気流量(kg/s)、 C_c = 縮流係数(-)、 κ = 比熱比(-)、

P_1 = ヘッダ元圧即ち目孔 1 次側圧力(上記) (P_a)、 ρ_1 = 目孔 1 次側の蒸気密度(kg/m³)

A_o = 孔通過面積(m²) = πr_o^2

この式は基本的には高圧ガス保安法コンビ則関係基準の式と同じである。ヘッダーの全流量は、

$$W_h = n m \quad (\text{但し } n = \text{目孔総数})$$

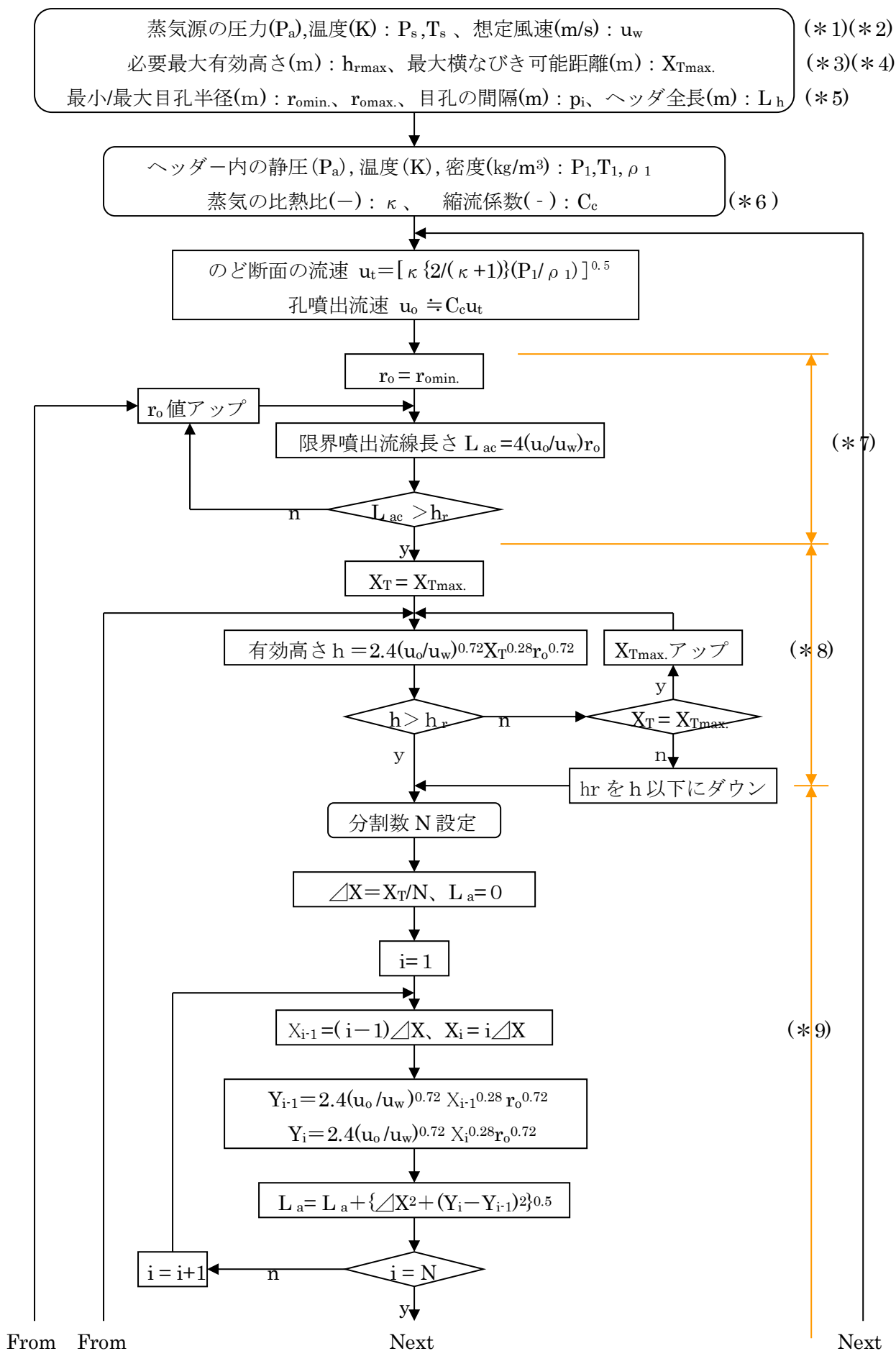
になる。この流量に基づいてヘッダーや導管などのサイズを決めてゆく。

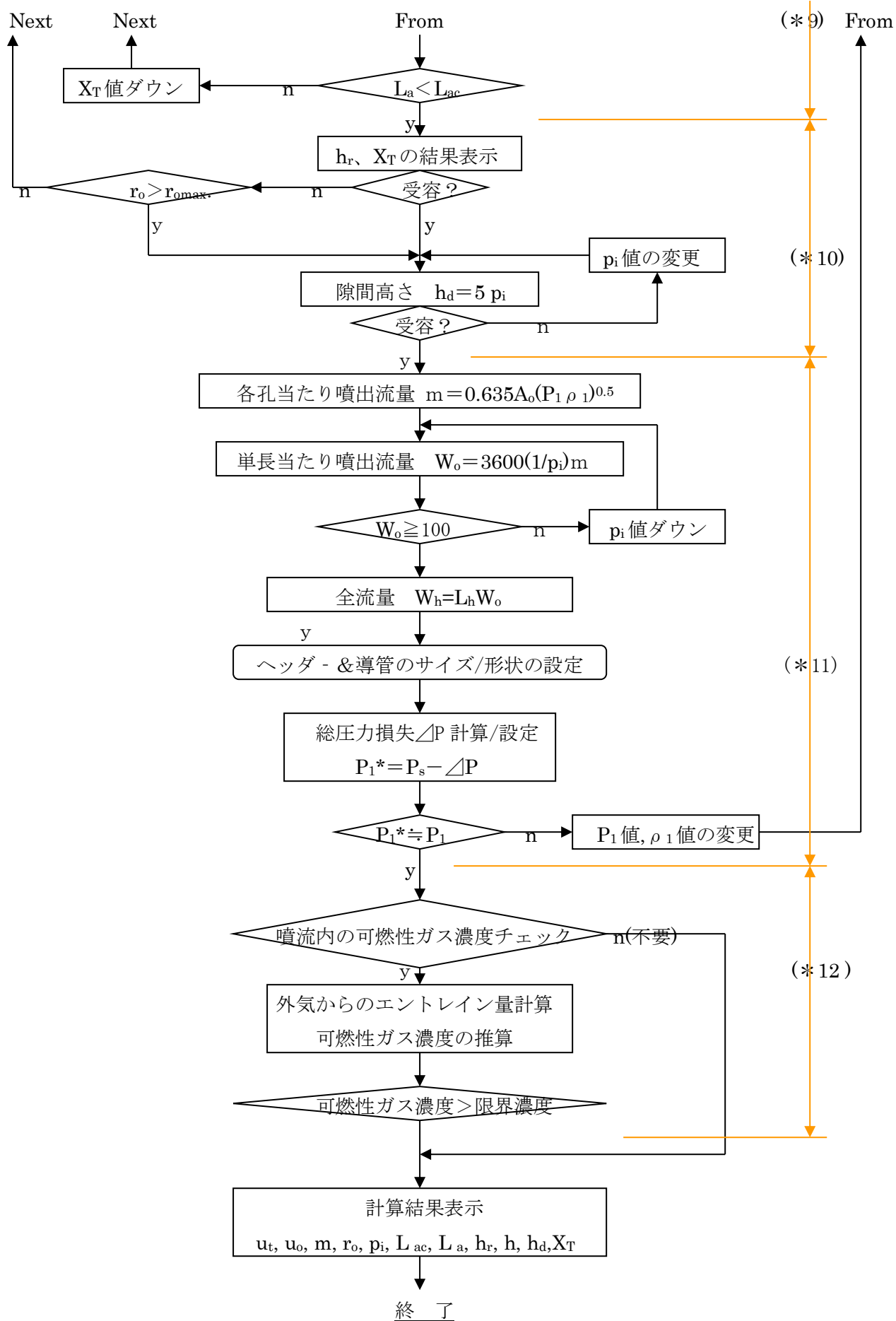
- 以上、(a)～(d)式をベースにしてスチームカーテンの設計が可能である。これらの式の導入については、5. 解説を参照のこと。

3. 設計手順 (例)

設計的にはヘッダー元圧をチョーク条件に見合うように保持し、上記の(a)～(d)式を用いてサイジングや配置を行えばよい。その手順をチャートにして以下に例示する。但し浮力を受ける上方噴出しのみに適用とする。下方噴出しの時も同様の手順となるが、浮力の影響を加味して有効高さ h を調整する必要があると思われる。

スチームカーテン要目決定手順(案)





< チャートの記号説明 >

u_t =のど部の流速 (m/s)、 u_o =孔噴出流速 (m/s)、 L_{ac} =限界噴出流線長さ (m)、 L_a =噴出流線の長さ (m)
 h =計算有効高さ (m)、 h_d =デッドスペースの隙間高さ (m)、 $N=X_T$ の分割数 (通常 20~40 程度)、
 X_{i-1} =分割区間始点の位置 (m)、 X_i =分割区間終点の位置 (m)、 Y_{i-1} =分割区間始点における高さ (m)、 Y_i
 =分割区間終点における高さ (m)、 m =各孔当たりの噴出流量 (kg/s)、
 L_h =ヘッダー全長 (m)、 W_h =ヘッダー-の全噴出流量 (kg/s)、 P_1^* =ヘッダー元圧の計算値 (P_a)
 W_o =ヘッダー単位長さ当たりの噴出流量 (kg/sm)

< チャートの脚注 >

- (*1) **蒸気源**とは当該ヘッダーに繋がる蒸気供給元。導管/減圧弁などの圧損の影響外にあつて、蒸気噴出時も圧力/温度が大きく変化しないことを前提とする。
- (*2) 通常採られている**想定風速** u_w はそんなに大きくなく 1~2m/s 程度かと思われる。協議による。
- (*3) **必要有効高さ**(h_r)はヘッダー噴出し口から遮蔽対象物の天辺までの高さ。大体 2~4m程度にしそれ以上の高さ範囲では多段ヘッダーか? 最大値($h_{rmax.}$)は計算上の初期値であるから、高めの 4m~6m程度に設定するのがよいと思われる。
- (*4) **最大横なびき可能距離**即ちヘッダーから対象物までの水平距離の最大値($X_{Tmax.}$)はヘッダーのレイアウトで自ずと決まってくるが、これも上記の $h_{rmax.}$ と同じように計算上の初期値である。故にできるだけ大きめの値をセットするようにする。
- (*5) 通常目孔径は 2~8mm が採られているので**目孔半径の最小,最大値** $r_{omin.}, r_{omax.}$ は 1mm、4mm で設定すればよいと思う。また**目孔の間隔(ピッチ)** p_i はデッドスペースの大きさに関係するので、できるだけ小さくするのがよい。通常 50mm~300mm である。
- (*6) ヘッダー元圧 P_1 は $P_1 > (\text{大気圧}) / \{2 / (\kappa + 1)\}^{1/(\kappa - 1)}$ となるように設定する。なお P_1 が大きいほど蒸気温度が高くなつてのど部流速 u_t がアップするとともに縮流係数 C_c がアップし、孔噴出流速 u_o が高くなって有効高さ h が増大する(設備機能上、優勢になる)。

縮流係数 C_c は噴流ののど部断面積と目孔断面積の割合。絞り要素の C_c については Benedict の式⁽⁹⁾があるが誤植があるのかグラフと合わない(調査中)。下記のデータは文献(3)から抜粋したもの。 $\kappa = 1.4$ ベースなので蒸気($\kappa = 1.33$)とはマッチしないが、近似値としては使えると思う。なお本ケースではグラフの P_o はヘッダー元圧、 P_b は大気圧になる。低压蒸気で **0.75** 程度になると思う。

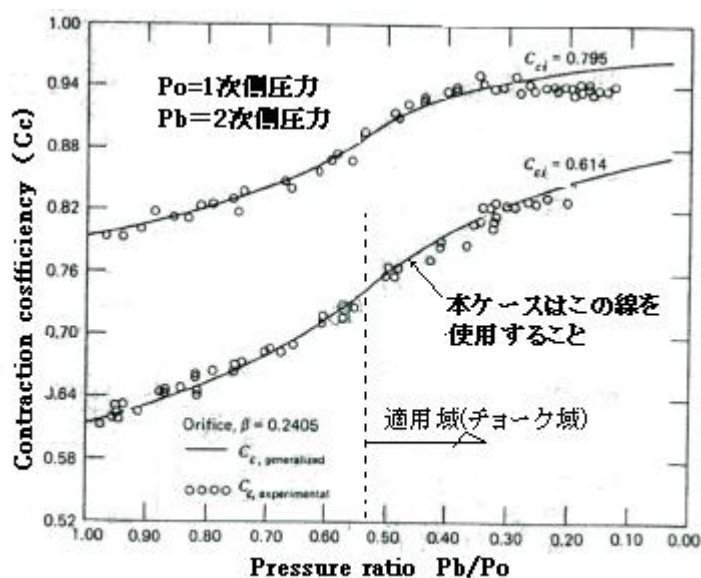
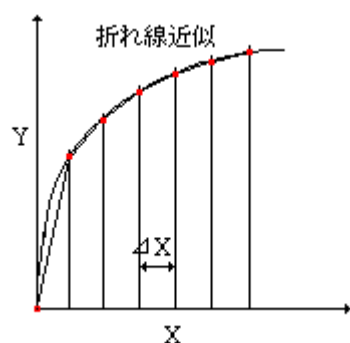


Figure 3.26 Comparisons between generalized contraction coefficient, analytical versus experimental.

(*7) 噴流の流速下限界に拠る限界噴出流線長さ L_{ac} を求め、これが少なくとも必要有効高さ h_r 以上にあることをプレ的にチェックするプロセスである。不足するときは、以降の計算が無駄になるので当初、最小値でセットされた目孔径をアップして、十分に h_r を上回るレベルにする。

(*8) 当初、対象物までの水平距離 X_T を最大値にセットして有効噴出高さ h を求め、これが必要有効高さを越えることを確認する。もし越えないなら初回 ($X_T = X_{Tmax}$ のとき) に限り X_{Tmax} を更に大きくかさ上げる。そのとき以外は設定値 h_r をダウンする。後工程で、 X_T がダウンされたら必然的に h は減少するので、この h_r のダウンはそこそこでよい。

(*9) 噴流が成立するには $h > h_r$ 以外に、噴出流線の長さ L_a が前工程で得られた L_{ac} 以下になる必要がある。そこで、想定噴流の L_a の近似計算を行う。これは流線を N 分割し各分割の曲線を折線近似で求めその合計を L_a 値とするもの。得られた L_a を L_{ac} と比べ $L_a < L_{ac}$ なら成立、でないならば不成立として X_T 値をダウンして、(*8) に戻して計算を繰り返す。



(*10) 以上の(*8)(*9)の繰り返し計算の結果、 X_T, h_r は過度にダウンする可能性がある。そこで X_T, h_r の値を確認し設備として受容できるか否かを判断する。もし不可ならば目孔サイズ r_o をアップしてみても(*7)–(*9)の計算を繰り返す。なおこの過程で r_o が所定の $r_{o,max}$ を越えるならそこで打ち切り。更にデッドスペースの隙間高さ h_d を確認しながら目孔間隔 p_i を決める。なお、大きな r_o や小さい p_i の選択は、流量 m の増大に繋がるので念為。ただ、高圧ガス保安法ではヘッダ単長当たりの流量の下限界が抑えられているので注意のこと。

(*11) ここではまず高圧ガス保安法で規定されるヘッダー単長当たりの最小噴出流量 W_0 をチェックして目孔間隔 p_i を調整する。さらに全流量からヘッダー/導管/弁類など系の圧損を求め、設備サイズを調整する。蒸気源圧力から圧損 ΔP から差し引いたヘッダ圧力 P_1^* を、設定した P_1 にどうしても合わせられないなら再度 P_1 を設定して初めから計算を繰り返しバランスをとる。なお蒸気噴出時のマッハ数は短期的なので、0.2 を多少越えてもよいと思う。

(*12) 漏洩した可燃性ガス濃度が著しく高いときは蒸気噴流中に巻き込まれたガス濃度が高くなる恐れがあるので、外気から噴流内へのエントレイン量を求め、ガス濃度が許容を越えないことを確認する。

4. 例題

ヘッダーの圧力/温度/密度 2.5ata、140°C、1.317 kg/m³ という条件で、**2.5m** 程度の有効高さを確保したい。目孔径 $2r_0$ 、対象物までの水平距離 X_T (Max.2.0m) を求めよ。ただし想定風速は 1m/s とする。

$r_0 = 1\text{mm}$ から試行したが、 **$r_0 = 2.5\text{mm}$** が適切であった。以下、結果を記す。

$$\text{のど部流速} : u_t = [\kappa \{2/(\kappa + 1)\} (P_1 / \rho_1)]^{0.5} = [1.33 \{2/(1.33 + 1)\} (9.807 \times 25000 / 1.317)]^{0.5} = 461\text{m/s}$$

$$\text{噴出し流速} : u_0 = C_c u_t = 0.75 \times 461 = 346\text{m/s}$$

$$\text{限界噴出流線長さ} : L_{ac} = 4(u_0 / u_w) r_0 = 4 \times (346 / 1) \times 0.0025 = \mathbf{3.46\text{m}}$$

$$\text{各孔あたり流量} : m = 0.635 A_0 (P_1 \rho_1)^{0.5} = 0.635 \times (3.14 \times 0.0025^2) \times (9.807 \times 25000 \times 1.317)^{0.5} = 0.00708 \text{ kg/s}$$

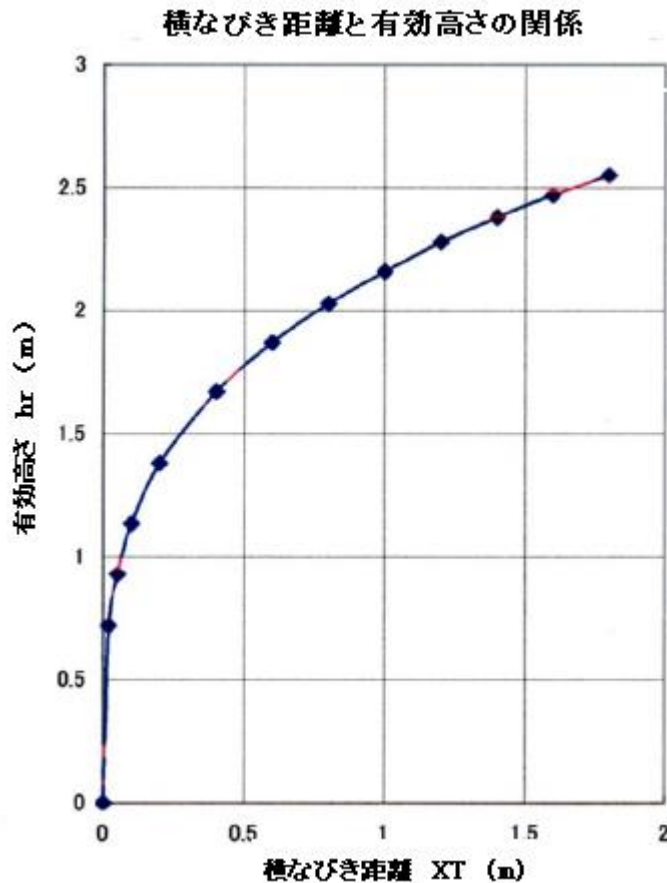
$$\text{有効高さ} : h = 2.4(u_0 / u_w)^{0.72} X_T^{0.28} r_0^{0.72} = 2.4(346/1)^{0.72} X_T^{0.28} 0.0025^{0.72} = 2.162 X_T^{0.28}$$

$X_T - h - L_a$ の関係は次の通り

$X_T = 0.0$	$h = 0.00\text{m}$	$\left. \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\} 0.02^2 + (0.72 - 0)^2 = 0.72 \rightarrow L_a = 0.72 \text{ m}$
$X_T = 0.02$	$h = 0.72\text{m}$	$\left. \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\} 0.03^2 + (0.93 - 0.72)^2 = 0.212 \rightarrow L_a = 0.932 \text{ m}$
$X_T = 0.05$	$h = 0.93\text{m}$	$\left. \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\} 0.05^2 + (1.135 - 0.93)^2 = 0.211 \rightarrow L_a = 1.143 \text{ m}$
$X_T = 0.10$	$h = 1.135\text{m}$	$\left. \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\} 0.10^2 + (1.38 - 1.135)^2 = 0.265 \rightarrow L_a = 1.408 \text{ m}$
$X_T = 0.2$	$h = 1.38\text{m}$	$\left. \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\} 0.2^2 + (1.67 - 1.38)^2 = 0.352 \rightarrow L_a = 1.760 \text{ m}$
$X_T = 0.4$	$h = 1.67\text{m}$	$\left. \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\} 0.2^2 + (1.87 - 1.67)^2 = 0.283 \rightarrow L_a = 2.043 \text{ m}$
$X_T = 0.6$	$h = 1.87\text{m}$	$\left. \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\} 0.2^2 + (2.03 - 1.87)^2 = 0.256 \rightarrow L_a = 2.299 \text{ m}$
$X_T = 0.8$	$h = 2.03\text{m}$	$\left. \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\} 0.2^2 + (2.16 - 2.03)^2 = 0.239 \rightarrow L_a = 2.538 \text{ m}$
$X_T = 1.0$	$h = 2.16\text{m}$	$\left. \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\} 0.2^2 + (2.28 - 2.16)^2 = 0.233 \rightarrow L_a = 2.771 \text{ m}$
$X_T = 1.2$	$h = 2.28\text{m}$	$\left. \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\} 0.2^2 + (2.38 - 2.28)^2 = 0.224 \rightarrow L_a = 2.995 \text{ m}$
$X_T = 1.4$	$h = 2.38\text{m}$	$\left. \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\} 0.2^2 + (2.47 - 2.38)^2 = 0.219 \rightarrow L_a = 3.214 \text{ m}$
$X_T = 1.6$	$h = 2.47\text{m}$	$\left. \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\} 0.2^2 + (2.55 - 2.47)^2 = 0.215 \rightarrow L_a = \mathbf{3.429\text{m}}$
$X_T = 1.8$	$h = 2.55\text{m}$	$\left. \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\} 0.2^2 + (2.63 - 2.55)^2 = 0.214 \rightarrow L_a = 3.643 \text{ m}$
$X_T = 2.0$	$h = 2.63\text{m}$	

結果として $X_T = 1.8\text{m}$ 位置で、有効高さ $h = 2.55\text{m}$ 、噴出流線長さ $L_a = 3.429\text{m}$ となり、必要有効高さ 2.5m 及び限界噴出流線長さ 3.46m をクリアする。

XT-h 関係即ちレファレンスラインの形状は以下のようなになる。



5. 解説

(1) スチームカーテン設備においては、まずヘッダーからの蒸気噴出をどう扱うかという問題がある。

この蒸気噴出は浮力噴流であるが、通常、噴出流速は音速すなわち略 400~500m/s 程度になるため、かなりモーメントが大きくなる。Blevins のテキストによれば、噴流軸方向長さ Xが次のとき、モーメント支配の通常の均質噴流で扱える。

$$X < M_0^{0.75} / B^{0.5} \quad \text{ここで } M_0 = Q_0^2 / A_0, \quad B = Q_0 g (\rho_a - \rho_0) / \rho_a$$

但し Q_0 = 噴出流量 (m^3/s)、 A_0 = 噴孔面積 (m^2)、 ρ_a = 外気密度 (kg/m^3)、 ρ_0 = 噴出蒸気密度 (kg/m^3)
 目孔径 3mm、ヘッダ元圧 2.5ata、密度 1.282 kg/m^3 の噴流を考えると、

$$\begin{aligned} Q_0 &= C_c U_t A_0 = 0.75x [1.33x \{2 / (1.33 + 1)\} x 9.807x 25000 / 1.282]^{0.5} x (0.7854x 0.003^2) \\ &= 0.75x 467x 7.069x 10^{-6} = 0.00248 \text{m}^3/\text{s} \end{aligned}$$

$$M_0 = 0.00248^2 / 7.069x 10^{-6} = 0.87, \quad B = 0.00248x 9.807x (1.17 - 0.7) / 1.17 = 0.00973$$

$$\therefore X < 0.87^{0.75} / 0.00973^{0.5} = 9.1\text{m}$$

従って、この噴流は約 9 m の距離(高さ)まではモーメント支配の噴流になる。また、この噴流は圧縮性流れであってしかも高温であるので、噴流の放出過程で、

周辺空気への放熱冷却 → 収縮、 蒸気密度の減少 → 膨張

変化がおきる。しかし相殺的である上に、いずれも短時間でかつ軽微であるので大きな状態変化はなく非圧縮性流れで十分近似できる。また、蒸気よりも周辺の空気が重たいので上方噴出しでも重力効果は殆ど無視できる(むしろ浮力によって有効高さ増加)。また下方噴出しでもモーメント支配が強いのので上方噴出しに比べ左程、噴出しが劣ることはないと思える(?)。

以上の思案からスチームカーテンの噴流は均質/非圧縮性の、通常の噴流で扱って支障ないと判断する。
[均質であることは、重力が浮力によってキャンセルされることを意味する。]

(2) Blevins のテキストによれば、横風を受ける均質噴流の上方噴出プロフィールは次式で与えられる。

$$\text{Bottom : } (y/r_o) = 1.89(u_o/u_w)^{0.72}(x/r_o)^{0.28}$$

$$\text{Center-line : } (y/r_o) = 2.90(u_o/u_w)^{0.72}(x/r_o)^{0.28}$$

$$\text{Top : } (y/r_o) = 3.87(u_o/u_w)^{0.72}(x/r_o)^{0.28}$$

これを変形して、

$$\text{Bottom : } y = 1.89(u_o/u_w)^{0.72}x^{0.28}r_o^{0.72}$$

$$\text{Center-line : } y = 2.90(u_o/u_w)^{0.72}x^{0.28}r_o^{0.72}$$

$$\text{Top : } y = 3.87(u_o/u_w)^{0.72}x^{0.28}r_o^{0.72}$$

対象物との関係からみれば、Bottom-line が基準になるが、図 2 からみて、余りに安全側すぎるようなので、ここでは Center-line と Bottom-line の中間、即ち

$$y = \{(1.89 + 2.9)/2\}(u_o/u_w)^{0.72}x^{0.28}r_o^{0.72} = 2.4(u_o/u_w)^{0.72}x^{0.28}r_o^{0.72}$$

を基準ライン(レファレンスライン)とする。なお、原点からの水平距離 x を風による横なびき可能距離 X_T とすれば、噴出口からの有効高さ(深さ) h は X_T によって与えられる y 座標の値になる。即ち

$$h = 2.4(u_o/u_w)^{0.72} X_T^{0.28} r_o^{0.72} \quad \text{-----本文の(a)式}$$

なお、Blevins のテキストに示される上記のプロフィール式は、 (u_o/u_w) 比が 5~35 の範囲における Pratte & Baines の実験式⁽²⁾であり、本ケースは u_o が相当に大きく (u_o/u_w) 比が 350 程度にもなり相当な開きがある。しかし同じモーメント支配の流れであることを考えれば、この横なびき噴流のプロフィールは大きく変化するとは思えない[実際、Pratte & Baines の実験データには (u_o/u_w) 比の多寡による影響は見られない]。故に Blevins のテキストに記載された式をそのまま使用する。

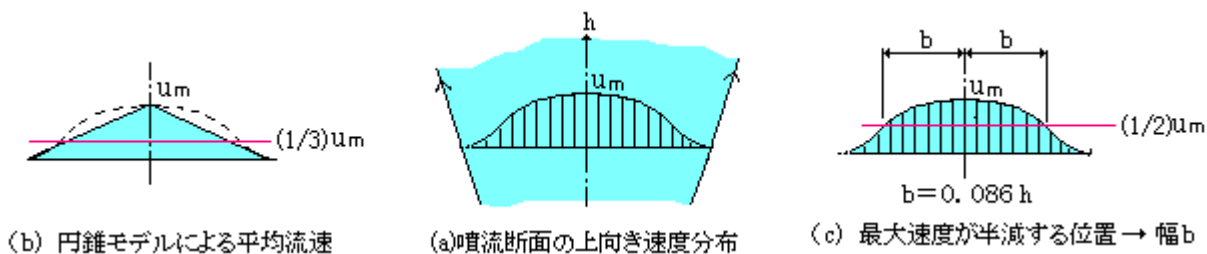
(3) ヘッダーからの音速噴流はヘッダーから遠ざかるにつれて膨張し減速する。文献(4)では、噴流の速度がある限度以下になると風によって乱されるので、流速限界に達するまでの高さを有効高さとして考えている。然るに横なびき噴流断面は肝臓形に変形するためか、確定的な流速分布式が見当たらない。そこで、無風状態の鉛直噴流の中心軸方向流速分布と有風状態の横なびき噴流のセンターライン沿い流速分布が同じと仮定する(本文図 3 参照)。鉛直噴流の中心流速は、Blevins テキストの Table9-3 から、

$$u_m = 12(r_o/h)u_o$$

中心流速は最大値で、周辺に向かって減少する。これを下図(b)のように円錐分布と見なすと平均流速は $u_m^* = (1/3)u_m$ になる。仮にこの平均流速 u_m^* が風速 u_w に等しいとき攪乱消散がおきるとすれば $u_m = 3u_w$ である(多分この推定は十分安全側と思われる)から、これを上式に代入して、

$$h = 4(u_o/u_w)r_o \quad \text{-----本文の(b)式}$$

この有効高さは鉛直噴流のセンターラインの弧長さであるので、これを限界噴出流線長さ L_{ac} として、有風状態の横なびき噴流のセンターラインの弧長さ L の上限とする。



(4) 本文図4のデッドスペースは、有効高さを損じるので、予めその高さを知っておく必要がある。デッドスペース高さは、隣合う2つの噴流の半分幅の合計=孔の間隔 p_i になるポイントまでの高さになる。テキスト(あるいは【FE-12-TM-001】)のTable9-3によれば、流速が中心の u_m の半分になる位置 b は、上図(c)の如く $b = 0.086h$ になるが、あいにくと噴流の外郭の位置は与えられておらず、それを正確に出すには面倒な積分をやることになる。ここでは外郭位置を $1.15b$ 程度に見繕って

$$p_i = 2 \times 1.15 b = 2.3 \times 0.086 h_d \rightarrow h_d = 5 p_i \text{ -----本文の(c)式}$$

とする(ここで h は h_d と表記している)。

(5) 目孔からの噴出し量の見積もりは設備サイズを決める上で必須である。各目孔当たりの噴出流量は、

$$m = \rho_t u_t A_t$$

ここで ρ, u, A はそれぞれ密度、流速、断面積でサフィックス t は、のど(throat)を意味する。こののど部は先細ノズルの先端に模擬される。のど部の蒸気密度 ρ_t は、 $P_t = P_o \{2/(\kappa + 1)\}^{\kappa/(\kappa - 1)}$ 、 $T_t = T_o \{2/(\kappa + 1)\}$ の関係を用いて、 $\rho_t = \{2/(\kappa + 1)\}^{1/(\kappa - 1)} \{P_o / (RT_o)\}$ である。またのど部の蒸気流速 u_t は、音速であって、 $u_t = (\kappa RT_t)^{0.5} = [\kappa \{2/(\kappa + 1)\} RT_o]^{0.5}$ 、またのど部の断面積 A_t は $A_t = C_c A_o$ (ここで C_c は縮流係数)である。故に、

$$m = \{2/(\kappa + 1)\}^{1/(\kappa - 1)} \{P_o / (RT_o)\} [\kappa \{2/(\kappa + 1)\} RT_o]^{0.5} C_c A_o$$

$$= [\kappa \{2/(\kappa + 1)\}^{(\kappa + 1)/(\kappa - 1)}]^{0.5} C_c A_o P_o \{1/(RT_o)\}^{0.5}$$

ここでヘッダの全圧力、全温度 P_o, T_o は、低マッハ数の場合、静圧、静温度 P_1, T_1 にほぼ等しいので

$$m = [\kappa \{2/(\kappa + 1)\}^{(\kappa + 1)/(\kappa - 1)}]^{0.5} C_c A_o P_1 \{1/(RT_1)\}^{0.5}$$

$R = (P_1 / \rho_1 / T_1)$ なので、

$$m = [\kappa \{2/(\kappa + 1)\}^{(\kappa + 1)/(\kappa - 1)} \rho_1 P_1]^{0.5} C_c A_o \text{ ----- (d')}$$

[縮流係数 C_c はチャートの脚注(*6)で述べた事情で、正確な式を調査中。]

高圧ガス保安法関係ではこの噴出流量が規定されている。「神奈川県可燃毒性ガス除害設備基準」では

$$W = AKP(M/T)^{0.5}$$

ここで W =吹き出し量(kg/hr)、 A =吹き出し面積(cm^2)、 P =吹き出し圧力(kg/ cm^2)、 K =定数=185.3
 M =水の分子量、 T =スチームの温度(K)、

$W = 3600m$ 、 $A = 10000A_o$ 、 $K = 185.3$ 、 $P = P_1/9.807/10000$ 、 $M = 8314.6/R$ 、 $T = T_1$ であるから

$$m = AKP(M/T)^{0.5} / 3600 = 10000A_o \times 185.3 \times P_1 / 98070 \times (8314.6/R/T_1)^{0.5} / 3600$$

$$= 0.4785A_o P_1 (\rho_1 / P_1)^{0.5} = 0.478A_o (P_1 \rho_1)^{0.5}$$

一方、(d')式において、 $\kappa = 1.33$ 、 $C_c = 0.72$ (代表値)、とすれば

$$m = \{1.33(2/2.33)^{7.06}\}^{0.5} \times 0.72 \times A_o (P_1 \rho_1)^{0.5} = 0.484 A_o (P_1 \rho_1)^{0.5}$$

従って、除害設備基準の流量式は(d')式とだいたい合っていることがわかる。

また、コンビナート保安規則関連例示基準では

$$q=0.0199A(P/v)^{0.5} \quad (A,P \text{ は除害設備基準の流量式に同じ、} v = \text{比容積(m}^3/\text{kg)})$$

ここで、 $q=m$ 、 $A=10000A_0$ 、 $P=P_1/9.807/10000$ 、 $v=1/\rho_1$ であるから、

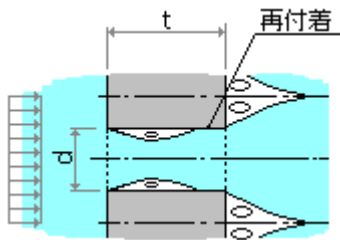
$$m=0.0199 \times 10000 A_0 \times (P_1 \rho_1 / 98070)^{0.5} = \mathbf{0.635 A_0 (P_1 \rho_1)^{0.5}}$$

すなわち(d')式と合わない。(d')式において $C_c=0.945$ とすると

$$m=(0.945/0.72) \times 0.484 A_0 (P_1 \rho_1)^{0.5} = \mathbf{0.635 A_0 (P_1 \rho_1)^{0.5}}$$

例示基準に合致する。何故、 $C_c=0.945$ なのか?

恐らく、これは孔通過流れの扱いに因ると思われる。仮に管の肉厚を 5mm、目孔径を 4mm にすると肉厚比は 1.25 になり、孔通過流れは下図のように再付着が起きる。この再付着は粘性抵抗をダウンさせるので、流れやすくなる。この影響を最大限に評価して $C_c=1$ とし、更に速度係数 0.95 程度を乗じて $C_c=0.945$ (実際は排出係数相当)にしたのではないかと思う。



規則的には 0.72→0.945 にすることで、約 30%流量がアップし設備的には安全側になる。本 TS でも $C_c=1$ を採り、コンビ則関連基準の式と同じ式を用いる。即ち

$$m=0.635A_0(\rho_1 P_1)^{0.5} \quad \text{-----本文の(d)式}$$

なおコンビ則関連基準ではヘッダー単位長さ当たりの噴出流量 W_0 を 100 kg/hrm としている。これは目孔間隔を小さくしデッドスペースを抑えるための措置ではないかと思われる。噴出流量 W_0 は、

$$W_0=3600(1/\pi)m \quad (\text{kg/hrm})$$

で与えられる。本手順でもこれをチェックするようにしている。

- (6) 参考に文献(4)に記載された実施例を示しておく。要目決定の目安になる、
- (a) 設置位置は既存設備が多い(?)のでプラットホームや地上が多い。
 - (b) 遮断エリアはプラットホームと地表の間が多い(?)。
 - (c) 運用上問題から各加熱炉など個別に設置する例が多い。
 - (d) 使用スチームは低圧蒸気(3 kg/cm²G)、中圧蒸気(16 kg/cm²)である。
 - (e) 噴射孔は 2~6mm のキリ孔が多い。
 - (f) 噴射ピッチは 50~300mm が多い。
 - (g) 噴射管の分割長さは 10~30m 前後である。
 - (h) 設計風速は 2m/s が多い。
 - (i) スチームカーテン 1 個当たりの有効高さは 3~5m が多い。

上記の設計風速は、 $L_a < L_{ac}$ という必要条件をチェックするときのもので、 $h > h_r$ をチェックするときのそれと違っていると思われる。即ち平均流速 > 設計風速(2倍 x 想定風速)をチェック。さすれば $h > h_r$ のチェックでは設計風速の半分 1m/s を使用することになると思われる。

引用文献：

- (1) R. D. Blevins “Applied Fluid Dynamics Handbook“ (Von Nostrand Reinhold Co.)
9.3.3 Round Jets in Cross Flow
- (2) Pratte, B.D., and W.D.Baines “Profiles of Round turbulent Jets in a Cross Flow”
ASCE J. Hydraulics div. 92, 53-64 (1967) ; also see corrections ASCE J. Hydraulics div.93
815-816(1968)
- (3) Robert. P. Benedict 「Fundamentals of Pipe Flow」 (A Wiley-Interscience Publication)
10.10 Differential pressure type fluid meters
- (4) 「スチームカーテンとその実施例」日揮・岩本 (配管技術’77.9. p59～65)